

Harri Turkki

Geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin olennaiset käsitteet ja periaatteet

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Maanmittaustekniikka

Insinöörityö

11.12.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Harri Turkki Geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin olennaiset käsitteet ja periaatteet 32 sivua 11.12.2015
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	maanmittaustekniikka
Ohjaajat	yliopettaja Vesa Rope diplomi-insinööri Jalle Bäcklund
<p>Insinöörityön tarkoituksena on toimia laajemman ohjeistuksen pohjana. Suomen geoteknillisen yhdistyksen monitorointitoimikunta tulee vuoden 2016 aikana laatimaan ohjeistuksen geoteknisistä mittauksista ja monitoroinnista ohjeistuksen, jonka osana tätä insinöörityötä tullaan käyttämään. Työn tavoitteena on antaa perustiedot geoteknisistä mittauksista ja monitoroinnista eri toimijoille, jotka näiden parissa työskentelevät.</p> <p>Insinöörityössä käydään läpi alalla käytössä olevaa sanastoa ja selitetään niiden merkitys. Työssä kerrotaan geoteknisen mittaamisen ja monitoroinnin eri menetelmistä, sekä niiden käyttökohteista. Lisäksi pyritään selvittämään, milloin mitäkin menetelmää olisi tarkoituksen mukaista milloinkin käyttää.</p> <p>Työn tuloksena saatiin aikaan ohjeistus, jonka pohjalle monitorointitoimikunta pystyy luomaan ohjeistuksen, joka sisältää entistä kattavammin geoteknisiä mittausmenetelmiä.</p>	
Avainsanat	geotekninen mittaaminen, monitorointi, seurantamittaus, painuma, siirtymä

Author Title Number of Pages Date	Harri Turkki Measurements and monitoring of essential geotechnical concepts and principles 32 pages 11 December 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Land Surveying
Instructors	Vesa Rope, Principal Lecturer Jalle Bäcklund, M.Sc.
<p>The purpose of this thesis was to create a basis for the set of broader guidelines for geotechnical measurements and monitoring that is to be compiled by the Finnish Geotechnical Society Monitoring Committee. The aim of the thesis was to offer some basic knowledge of geotechnical measurements and monitoring to the various actors that work with these issues.</p> <p>The thesis collected and explained the active vocabulary in the field. The thesis described the methods used in geotechnical measurement and monitoring. In addition, the thesis established what method should be used for any given task.</p> <p>As a result of the final year project, a set of instructions was created. On this foundation, the monitoring committee will be able to create the instructions that include a more comprehensive set of geotechnical measurement methods.</p>	
Keywords	geotechnical measuring, monitoring, follow-up measurement, deflection, displacement

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Työn taustat	1
1.2	Suomen geoteknillinen yhdistys ja monitorointitoimikunta	1
1.3	Geotekninen mittaaminen	2
1.4	Monitorointi	3
2	Olennaiset käsitteet	4
3	Mittausmenetelmät ja tarkkuusvaatimukset	8
3.1	Tarkkuusvaatimukset	9
3.2	Menetelmän valinta	10
3.3	Takymetrimittaukset	11
3.3.1	Prismat	13
3.3.2	Seurantapisteet	14
3.4	Inklinometrimittaus	15
3.5	Tarkkavaaitus	16
3.6	Ekstensometri	19
3.7	Satelliittimittaukset	20
3.7.1	Absoluuttinen paikanmääritys	20
3.7.2	Differentiaalinen paikanmääritys	20
3.7.3	Suhteellinen paikanmääritys	21
3.7.4	Satelliittipaikannuksen käyttö monitoroinnissa	22
3.8	Laserkeilaus	23
3.9	Tulosten analysointi	23
4	Mittausten laatu ja laadun varmistus	25
4.1	Virhelajit	25
4.1.1	Karkea virhe	26
4.1.2	Säännöllinen virhe	26
4.1.3	Satunnainen virhe	26
4.1.4	Todellinen virhe	26
4.2	Hyvä mittaustapa	26
4.3	Kalibrointi	27
4.3.1	Kalibrointilajit	27

4.3.2	Määrittyskalibrointi	28
4.3.3	Seurantakalibrointi	28
5	Mittausohjelman laatiminen	29
6	Yhteenveto	30
	Lähteet	31

Lyhenteet

DGPS	Differentiaalien satelliittipaikannus
Glonass	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema. Glonass on Venäjän ylläpitämä GPS-tyyppinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
GNSS	Global Navigation Satellite System. GNSS on maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä. Muun muassa GPS, Glonass ja kehitteillä oleva Galileo ovat sen osajärjestelmiä.
GPS	Global Positioning System. GPS on Yhdysvaltain puolustusministeriön ylläpitämä maailmanlaajuinen satelliittipaikannusjärjestelmä.
ppm	Parts per milloin, suomeksi miljoonasosa (10^{-6}). Käytetään matkaan verrannollisten virheiden ja korjausten yhteydessä.
RTK	Real Time Kinematic, satelliittipaikannuksen mittausmenetelmä, jossa käytetään satelliitin kanta-aallon vaihetta hyväksi sijainnin määrittämisessä.
SGY	Suomen geoteknillinen yhdistys.

1 Johdanto

1.1 Työn taustat

Tämä insinöörityö on tehty Metropolia Ammattikorkeakoulussa Suomen geoteknillisen yhdistyksen monitorointitoimikunnan toimeksiannosta. Työn ohjaavana opettajana toimi Metropolia Ammattikorkeakoulun yliopettaja Vesa Rope ja ohjaajana diplomi-insinööri Jalle Bäcklund. Insinöörityön ohjausryhmänä toimivat SGY:n monitorointitoimikunnan jäsenet:

Sami Ylönen
Kalle Rantala
Tuomas Kärki
Miika Kostamo
Heikki Luomala
Risto Takkinen
Hannu Halkola
Panu Tolla
Pauli Saksa
Tarmo Tarkkio

Insinöörityön tarkoituksena on selventää geoteknisten mittausten parissa toimiville koulutustaustasta riippumatta eri menetelmien soveltuvuudesta erilaisiin kohteisiin sekä yleisemmät käsitteet. Tällä pyritään saamaan kaikki toimijat ymmärtämään mittausten peruseriaatteet, jolloin virheiden ja väärinymmärrysten määrä toivottavasti vähenee. Tässä insinöörityössä keskitytään yleisimmin geoteknisissä mittauksissa ja monitoroinnissa käytössä oleviin menetelmiin..

1.2 Suomen geoteknillinen yhdistys ja monitorointitoimikunta

SGY on maa- ja pohjarakentamisessa aktiivisesti työskentelevien suunnittelijoiden, tutkijoiden, urakoitsijoiden, rakennuttajien sekä laite- ja materiaalitoimittajien pätevin yhteisö Suomessa. Monitorointitoimikunta on yksi SGY:n toimikunnista, ja se on perustettu vuonna 2011. Toimikunnan yksi päätavoitteista on geoteknisestä monitoroinnista tiedottaminen Suomessa. Tämä insinöörityö liittyy monitorointitoimikunnan tavoitte-

seen monitorointiin liittyvästä tiedottamisesta. Työn pohjalta Monitorointitoimikunta laatii ohjeistuksen, joka tulee käsittämään laajemmin geoteknisiä mittaussuunnitelmia. [1]

1.3 Geotekninen mittaaminen

Geoteknisellä mittaamisella tarkoitetaan yleensä painuma- ja siirtymämittauksia, pohjaveden pinnan seuraamista, sekä huokosveden paineen mittaamista. Tässä insinöörityössä keskitytään siirtymien mittaamiseen, eli mittauksiin, joissa havaintona ovat välimatkat, kulmat, vaakasuunnat, pystysuunnat, korkeuserot ja näiden erilaiset kombinaatiot, toisin sanoen siis siirtymä- painuma- ja muodonmuutosmittaukset.

Siirtymämittaukset maanpäällisissä kohteissa suoritetaan pääasiassa takymetreillä, käyttäen apuna erilaisia prismoja tai prismattomasti lasersäteiden avulla. Mittausmenetelmällä, prismoilla ja takymetrin valinnalla voidaan merkittävästi vaikuttaa saavutettavaan tarkkuuteen. Esimerkiksi kartoitusmittauksissa yleensä käytettävillä prismoilla saatetaan merkittävästi lisätä mittauksen virhettä. Mittauksia suunniteltaessa onkin tärkeää kiinnittää huomiota kaluston kokonaistarkkuuteen, eikä huomioida ainoastaan valmistajien ilmoittamaan mittalaitteen tarkkuuteen. Maanpinnan alapuolella siirtymämittaukset suoritetaan inklinometreillä, jotka voidaan jakaa automaattisiin ja manuaalisiin.

Joissakin tapauksissa voidaan seurantamittaukset suorittaa käyttäen satelliittivastaanottimia. Tällöin mittaustarkkuudet kasvavat jonkin verran takymetrimittauksiin verrattuna. Käyttökohteita voivat esimerkiksi olla erilaiset maa-ainekasojen inventointimittaukset. Nykyään tällaisissa tapauksissa ovat yleistyneet myös laserkeilaukset, joilla pystytään mittaamaan huomattavan laajoja alueita kerrallaan sekä saada suuri määrä pisteitä mitattua lyhyessä ajassa. Keilaimet ovatkin esimerkiksi kaivosteollisuudessa vahvasti mukana. Myöskään laserkeilauksia ei vielä voida kaikkein tarkimpiin kohteisiin soveltaa.

Painumamittauksia suoritetaan tavallisimmin tarkkavaaituskojeella ja invarlatalla, mutta myös tavallinen vaaituskoje tai takymetri käy kohteissa, joissa tarkkuusvaatimukset eivät ole kovin korkeat.

1.4 Monitorointi

Monitorointimittauksella tarkoitetaan seuranta- tai tarkkailumittauksia sekä niistä saatujen tulosten tulkintaa. Standardi SFS-EN 1997-1 käyttää monitoroinnista termiä seuranta. Monitorointi käsittää mittaamisen lisäksi mittausten suunnittelun ja tulosten analysoinnin. [2]

Monitorointi on työkalu, jonka tulosten tulkinnan perusteella voidaan suorittaa toimenpiteitä, jotka muuttavat lopputulosta [3, s. 5].

Monitoroinnilla pyritään selvittämään rakenteiden yms. maanpäällisten ja alaisten kohteiden siirtymiä ja muodon muutoksia.

Tällaisia kohteita esiintyy esimerkiksi

- rakentamisessa, esim. rakennusten muodonmuutos kuormitettaessa
- koneiden valmistuksessa, esim. alustojen painumamittaus
- maa- ja kalliorakentamisessa, esim. perustuksien rakentamisessa
- geologiassa ja geomorfologiassa maan kuoren liikkeitä mitattaessa
- erilaisissa tutkimustoiminnoissa. [4, s. 4.]

2 Olennaiset käsitteet

Kuten monella alalla myös maanmittauksessa on paljon termejä ja käsitteitä, joiden tarkoitus ei välttämättä ole selvillä kuin alan ihmisille. Seuraavassa on selvitetty geoteknisten mittauksen ja monitoroinnin yleisimpien käsitteiden tarkoitusta. Näiden käsitteiden läpikäynti toivottavasti selkeyttää alan eri toimijoiden vuoropuhelua.

Absoluuttinen tarkkuus. Absoluuttisella, eli ulkoisella tarkkuudella tarkoitetaan koordinaattien sijaintitarkkuutta eli sitä, kuinka tarkasti pystytään kertomaan maantieteellinen sijainti jollekin kohteelle.[5, s. 40.] (Vrt. suhteellinen tarkkuus.)

Hystereesi. Hystereesi kuvaa suureen muuttumisen viivästymistä niin, että hetkellinen suureen arvo ei riipu vain tällöin vaikuttavista tekijöistä, vaan myös suureen aikaisemmasta kehityksestä. Siten mittausarvo tietyn todellisen arvon kohdalla on erilainen lähestyttäessä ko. arvoa kasvavaan suuntaan kuin lähestyttäessä vähenevään suuntaan. Tämä täytyy huomioida seurantamittauksissa, jossa mittaajalla täytyy olla aikaisemmat mittaustulokset käytettävissä. Tällöin pystytään arvioimaan hystereesin vaikutusta. [5, s. 40.]

Invarlatta. Tarkkavaaituksessa käytettävä latta, jonka mitta-asteikko on kiinnitetty invarnauhaan. Invarnauhan lämpölaajeneminen on pientä ja se on hyvin mallinnettavissa.

Keskihajonta. Keskihajonta kertoo, miten keskittyneitä havainnot ovat. Se kertoo, miten kaukana havainnot keskimäärin ovat keskiarvosta. Mitä suurempi keskimääräinen etäisyys on, sitä vähemmän keskittynyt jakauma on. Keskihajonta voi olla pieni, vaikka jakauman vaihteluväli olisi suuri.

Keskivirhe. Keskivirheellä tarkoitetaan keskimääräistä virhettä ja sitä voidaan käyttää mittaamaan tiettyä todennäköisyyttä vastaavaa luottamusväliä. Keskivirhe saadaan

kaavasta: $S = \frac{s}{\sqrt{n}}$, jossa s on keskihajonta ja n on otoksen koko.

Kiintopiste. Kiintopiste on liikkumaton piste, jonka tasokoordinaatit (x,y) ja/tai korkeuskoordinaatti (h) tunnetaan. Näiden pisteiden avulla mittaukset voidaan sitoa jo olemassa olevaan koordinaatti- ja korkeusjärjestelmään. Monitoroinnissa voi olla tarkoituk-

senmukaista luoda oma koordinaatti- ja korkeusjärjestelmä, jolloin pystytään välttämään vanhoissa järjestelmissä olevat virheet.

Kohina. Mittaustuloksissa on aina havaittavissa jonkin verran kohinaa. Kohinalla tarkoitetaan sattumanvaraista vaihtelua, joka aiheutuu jonkin laitteen, komponentin tai materiaalin fysiikasta. Kohina on mittaustulosten pientä eroavaisuutta todellisesta arvosta. Kohina on satunnaismuuttuja, joka voidaan määritellä ainoastaan tilastollisesti. Kohinan käyttäytymistä ei voida ennustaa eikä sitä voida poistaa. Suunnittelullisin keinoin sitä tai sen vaikutusta voidaan kuitenkin minimoida [6]

Kriittinen muodonmuutos. Kriittisellä muodonmuutoksella tarkoitetaan rakenteessa tapahtuvaa muutosta, joka ei enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa.

Mittalaitteen kalibrointi. Kaikki mittalaitteet mittaavat väärin, kuinka väärin se selviää kalibroinnilla. Maanmittausalan laitteet kannattaa viedä ennen kalibrointia maahan-tuojan huoltoon säätöä ja tarkistusta varten, minkä jälkeen se toimitetaan kalibroitavaksi esim. Mittatekniikan keskuksen.

Mittausepävarmuus. Mittausepävarmuus on arvio siitä, kuinka suuri mittausvirhe voi olla.

Mittaustaajuus. Mittaustaaajuudella tarkoitetaan mittausnäytteiden lukumäärä aikayksikössä.

Prisma. Prisma on optinen laite, joka taittaa valoa. Maanmittauksessa prismoilla käännetään takymetrin mittaussäde takaisin lähtöpisteeseen.

Referenssipiste. Monitoroitavien pisteiden läheisyyteen kiinnitetty piste, joka on pyritty sijoittamaan liikkumattomaan alustaan. Tätä pistettä ei käytetä takymetrin orientointiin.

Resoluutio. Resoluutiolla tarkoitetaan mittaustekniikassa mittaussädejärjestelmän erottelukykyä. Maanmittauksessa järjestelmän erottelukyky voi olla esimerkiksi 0,5 mm. Resoluutio on eri asia kuin tarkkuus.

Ryömintä. Ryöminnällä tarkoitetaan mittaustulosten siirtymistä vähitellen johonkin suuntaa, vaikka todellista liikettä ei olisikaan. Ryömintä voidaan estää mittalaitteen tarkastuksilla ja kalibroinneilla.

Staattinen herkkyys. Staattinen herkkyys kuvaa mittalaitteen tulosten vaihtuvuutta olosuhteiden muuttuessa. Jos laite on staattisesti herkkä, muuttuvat saadut tulokset tietyn funktion mukaan. Tätä funktiota kutsutaan siirtofunktioksi ja staattinen herkkyys on siirtofunktion derivaatta. [7]

Staattinen lineaarisuus. Staattisesta lineaarisuudesta puhuttaessa tarkoitetaan laitteen antamien tulosten olevan samoja, vaikka olosuhteet muuttuisivatkin. Tällöin mittalaitteen siirtofunktio on suora. [7]

Suhteellinen tarkkuus. Suhteellisella, eli sisäisellä tarkkuudella, tarkoitetaan sitä kuinka tarkasti mittalaite pystyy mittaamaan samaa kohdetta kerta toisensa jälkeen [4]. (Vrt. absoluuttinen tarkkuus.)

Sulkeminen. Mittauksen sulkeminen on käyttökelpoinen tapa hallita mahdollisia mittauksessa syntyviä virheitä. Kun mittaus suljetaan, mittaustulos tarkastetaan johonkin tunnettuun pisteeseen tai tarkistus tehdään jonkin suureen avulla. Sulkemisen yhteydessä määritetään sulkuvirhe, joka on suureen mitatun arvon ja oikeana pidetyn arvon erotus. Mittauksen sulkeminen voidaan toteuttaa hieman eri tavoin erilaisissa mittauksissa ja erilaisissa mittaustilanteissa. Seurantamittauksissa sulkeminen tulisi suorittaa jokaisella seurantakierroksella samalla tavalla. Erityisesti jonomuotoisissa runkomittauksissa, jonovaaituksessa ja jonomittauksessa (monikulmiojonomittauksessa) puhutaan sulkuvirheistä, kun arvioidaan mittausten tarkkuutta. [8, s. 41.]

Tasoittaminen. Mittauksen tasoittamisella tarkoitetaan sulkuvirheen tasoittamista mitatuille pisteille. Tasoituslaskenta suoritetaan pienimmän neliösumman menetelmällä. Seurantamittauksissa pyritään saamaan sulkuvirhe niin pieneksi, ettei tasoittamista tarvitsisi tehdä. Jos tasoittaminen joudutaan kuitenkin seurantamittauksissa tekemään, tulee se tehdä jokaisella kerralla samalla tavalla.

Varianssi. Varianssi on todennäköisyyslaskennassa ja tilastotieteessä satunnaismuuttujan hajonnan mitta. Varianssi kuvaa sitä, kuinka paljon satunnaismuuttujan arvot keskimäärin vaihtelevat odotusarvosta. Kun arvot keskittyvät odotusarvon ympärille tiiviisti,

on varianssin arvo pieni, ja kun arvot ovat hajallaan odotusarvon ympärillä, on sen arvo suuri.

Virhe. Mittauksen virhe on havaittu arvo miinus oikea arvo. Realistisena lähtökohtana voidaan pitää, että mittauksissa on aina jonkin verran virhettä. Virhelajeja on erilaisia, ja ne on esitelty työn loppupuolella. [5, s. 40.]

3 Mittausmenetelmät ja tarkkuusvaatimukset

Monitorointia voidaan suorittaa monin eri menetelmin. Tässä insinööriyössä keskitytään yleisimmin käytettyihin geoteknisiin mittausmenetelmiin, joista käsitellään tarkemmin

- takymetrimittaukset
- inklinometrimittaukset
- tarkkavaaitus
- ekstensiometri
- satelliittimittaukset
- laserkeilaus.

Monitoroinnin kohde ja vaatimukset määrittävät, mitä menetelmää on tarkoituksenmukaista milloinkin käyttää. Menetelmien tarkkuudessa, nopeudessa ja hinnassa on huomattavia eroja. Joitakin menetelmiä voidaan automatisoida, joka saattaa moninkertaistaa menetelmän hinnan. Toisissa tapauksissa automatisoinnilla saavutetaan taas huomattavia säästöjä. Taulukkoon 1 on koottu eri menetelmien suuntaa antavat tarkkuudet, jotka eivät ole absoluuttisia, vaan näihin arvoihin voidaan päästä mittaamalla oikein suotuisissa olosuhteissa. Lisäksi taulukossa on esitelty menetelmän yleisin käyttökohde sekä menetelmän hyvät ja huonot puolet.

Taulukko 1. Eri mittausmenetelmien tarkkuudet, käyttökohteet sekä hyvät ja huonot puolet.

Menetelmä	Tarkkuus	Käyttökohteet	+	-
Takymetri	0,2 - 10 mm	Tarkkuutta vaativat koh- teet	Tarkkuus	Automatisoinnin hinta
Inklinometri	2 - 30 mm	Maakerrosten liikkeet	Helppo au- tomatisointi	
Tarkkavaaitus	0,1 - 0,5 mm	Painumamittaukset	Nopeus	Ei tasotietoa
Ekstensometri	0,01 - 3 mm	Painuma- ja siirtymäm- mittaukset	Helppo au- tomatisointi	
Satelliittimittaus	x,y = 15 mm, h = 30 mm	Inventointikohteet	Hinta, Nope- us	Tarkkuus
Laserkeilaus	1 - 30 mm	Laajojen alueiden moni- torointi	Paljon tietoa	Laitteiston hinta

Valittaessa monitorointimenetelmää on ratkaisevaa odotettavissa oleva kohteen liike. Määrittäviä tekijöitä ovat liikkeen nopeus ja suuruus. Mittausten tarkkuuden tulee olla parempi kuin odotettavissa olevan liikkeen suuruus. Jos odotettavissa olevaa liikkeen suuruutta ei tiedetä, voidaan tarkkuuden lähtökohtana pitää kriittistä deformaatiota.

Monitorointimittauksien kohteet ovat usein kohteita, joissa muodonmuutokset tapahtuvat hyvin hitaasti. Tällöin myös mittauksia suoritetaan hyvin pitkällä aikavälillä. Vaarana on, että aikaisemmin käytetty mittalaite rikkoutuu tai tulee muuten käyttöikänsä päähän ja sitä ei voida enää käyttää. Tällaisissa tapauksissa, mikäli mahdollista, tulisi laitteen vaihdon yhteydessä suorittaa mittaukset sekä uudella ja vanhalla laitteistolla. Tällöin voidaan määrittää uuden ja vanhan laitteen antamien arvojen ero. [9, s. 7.]

3.1 Tarkkuusvaatimukset

Monitorointimittausten tarkkuusvaatimukset riippuvat kohteen odotettavissa olevasta liikkeen suuruudesta. Kohdepisteiden liikettä merkitään $D_i, i = 1 \dots m$, kun mittauksessa on m kohdepistettä ja määrittelyn hajonta σ_i . Yleisen käsityksen mukaan pitää olla voimassa määrittelyn hajonta arvo

$$\sigma_i \leq 0,04 D_i$$

Siten mittausepävarmuuden tulee olla korkeintaan 4 % muodonmuutoksen suuruudesta.

Tämä on tarkkuus, johon olisi suositeltavaa päästä. Jos tähän tarkkuuteen ei kuitenkaan päästä, kasvaa mittausten tulkinvaraisuus. Tällöin otetaan käyttöön yhdistettyä hajontaa, joka sisältää sekä sisäisen että ulkoisen hajonnan. Mittauksen kokonaisepävarmuus saadaan käyttämällä laajennuskerrointa k kertoimena eli

$$U_i = k \times \sigma_i$$

Kertoimelle k annetaan rakennusmittauksissa yleensä arvo 2,5, joka merkitsee todennäköisyyden kasvamista arvosta 68 % arvoon 99 %. Tällöin saadaan epävarmuudeksi

$$U_i \leq 0,1 D_i$$

Nyt mittausepävarmuuden tulee olla korkeintaan 10 % muodonmuutoksen suuruudesta. [10, s. 14.]

3.2 Menetelmän valinta

Mittausmenetelmää valittaessa tulee tarkkuustarkastelu suorittaa etukäteen. Yleensä tämä jo ohjaa helposti tiettyyn menetelmään. Vaikeissa erityistä tarkkuutta vaativissa kohteissa voi olla tarpeen testata valittu menetelmä ennen varsinaisten mittausten aloittamista.

Geodeettiset mittausmenetelmät ovat tarkoituksenmukaisia käyttää kun tutkittava muodonmuutos on hidas. Näiden menetelmien haittapuolena voidaan pitää sitä, että tuloksia ei saada reaaliaikaisesti ilman kallista automatisointia. Yleensä tulosten saaminen vaatii monituntisen mittauksen ja tulosten purkamisen mittalaitteesta. Tällöin on mahdollista, että mittauksen jo aikana kohteessa tapahtuu muutoksia ja mitatut arvot eivät anna oikeata kuvaa tilanteesta. Mikäli kohteessa on odotettavissa nopeita muodonmuutoksia, on nopeampien menetelmien käyttö perusteltua. Tällaisia ovat esim. auto-

matroidut takymetrimittaukset, jotka mittaavat kohdetta jatkuvasti mutta vaativat huomattavasti suuremmat mittausjärjestelyt, tai nykyään yleistyneet optiseen kuitutekniikkaan perustuvat menetelmät.

3.3 Takymetrimittaukset

Takymetri (kuva 1) on yhdistetty kulmien ja etäisyydenmittauskoje, jolla pystytään mittaamaan vaak- ja pystykulmien lisäksi kohteen etäisyyttä kojeesta. Näillä mittaushavainnoilla ja lähtöpisteiden tiedoilla koje pystyy laskemaan oman ja mitattavien pisteiden koordinaatit.



Kuva 1. Leica Geosystems TDRA6000-teollisuustakymetri

Monitorointimittauksissa takymetrillä saadaan seurattua kohteen liikettä sekä tasossa (x- ja y- suunta), että pystysuunnassa (z- suunta). Pystysuunnan tarkkuus ei ole aivan tarkkavaaituksen tasoa, joten usein korkeus mitataan vielä erikseen vaaitsemalla. Ennen kohteen mittaamista takymetri orientoidaan lähtöpisteiden avulla. Takymetrin orientointiin vaaditaan vähintään kaksi lähtöpistettä, mutta tarkoissa mittauksissa on

suositeltavaa käyttää useampaa. Useammilla lähtöpisteillä varmistetaan myös mittaus-
ten jatkuvuus, koska voi käydä niin että rakentamisen myötä jotkin lähtöpisteet tuhou-
tuvat. Lähtöpisteet on hyvä olla kiinnitetty mahdollisimman vähän liikkuvaan alustaan
esim. kallioon. Lisäksi tulee varmistaa, että lähtöpisteissä on selkeä ja yksiselitteinen
kohta, johon prismasauva keskistetään jokaisella kerralla. Lähtöpisteinä voidaan käyt-
tää myös tarraprismoja, jolloin ei tarvitse huolehtia prismasauvan keskistämisestä.
Helppokäyttöinen ja selkeä tapa on käyttää lähtöpisteinä pisteitä, joihin ruuvataan
prisman sovitin pysyvästi kiinni.



Kuva 2. Vasemmalla asfalttiin kiinnitetty lähtöpiste ja oikealla kallioon kiinnitetty lähtöpiste.

Kojeen orientointi on parasta suorittaa jokaisella mittauskerralla samaan paikkaan. Ide-
aalitapauksissa orientointia varten on kohteen läheisyyteen valettu betonipilari, jonka
päälle koje jokaisella kerralla orientoidaan. Tähän on kuitenkin harvoin mahdollisuutta,
joten kolmijalat, joiden päällä koje on, tulee sijoittaa jokaisella kerralla mahdollisimman
samaa paikkaan ja samalla korkeudelle. Näin mittauskulmat ovat mahdollisimman
samanlaiset eri mittauskerroilla. Kohteiden mittaaminen tulee myös suorittaa aina
identtisesti muihin kertoihin verrattuna.

Takymetrejä on eri tarkkuusluokista, ja karkeasti ne voidaan jakaa neljään eri tarkkuusluokkaan:

- rakennusmittaustakymetrit
- maanmittaustakymetrit
- insinöörimittaustakymetrit
- teollisuusmittaustakymetrit.

Tarkimmat takymetrit ovat käytössä teollisuuden mittauksissa ja epätarkimmat rakennusmittauksissa. Kojeen luokittelu tiettyyn ryhmään voi olla haastavaa, koska laitevalmistajat eivät yhteneväisiä vertailutuloksia kojeistansa helposti anna. Ennen monitorimittauksiin ryhtymistä pitää selvittää kulloinkin käytettävän takymetrin tarkkuus. Yleensä tämä on parhaiten tiedossa kojeen käyttäjällä itsellään.

Automatisoituja takymetrimittauksia Suomessa ei ole geoteknisissä mittauksissa juuri-kaan ollut käytössä, johtuen niiden varsin kalliista hinnasta. Maailmalla automatisoituja takymetrimittauksia käytetään mm. avolouhosten seurannassa.

3.3.1 Prisma

Takymetrimittausten tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi käytettävä prisma. Prismojen tarkkuudet vaihtelevat kuten itse kojeidenkin. Prismoille on omat käyttötarkoituksensa, esim. prisma joka soveltuu hyvin kartoitusmittauksiin, ei sovellu tarkkoihin seurantamittauksiin. Mittaukset voidaan suorittaa myös prismattomasti, mutta tällöin tarkkuudet kärsivät huomattavasti verrattuna prismoilla mittaamiseen.



Kuva 3. Erilaisia prismoja. Vasemmalta: 360°, pyöröprisma, tarkkuusprisma ja kuutionurkka [11]

Markkinoilla on useita prismojen valmistajia ja kuvassa 3 on esitelty Leican Geosystems-erilaisia prismoja. 360°-prisma soveltuu hyvin kartoitusmittauksiin ja sen keskistystarkkuus on $\pm 5,0$ mm. Pyöröprisman, jota käytetään jonomittauksissa, keskistystarkkuus on 1,0 mm. Tarkkuusprisman käyttökohteina erilaiset teollisuudenmittaukset ja sen keskistystarkkuus on 0,3 mm. Kuutionurkkaa käytetään myös teollisuuden mittauksissa ja keskistystarkkuus 0,003 mm. [11]

3.3.2 Seurantapisteet

Kuten lähtöpisteiden, tulee seurattavienkin pisteiden olla kunnolla kiinni kohteessaan ja mitattavissa jokaisella kerralla samasta kohtaa. Seurantapisteet tulee sijoittaa kohteeseen siten, että niiden mahdollinen liike kuvaa kohteen liikettä mahdollisimman kattavasti. Tällöin tulosten analysointi on helpompaa, esim. korkean tornin monitoroinnissa seurantapisteitä on hyvä olla koko tornin matkalla.

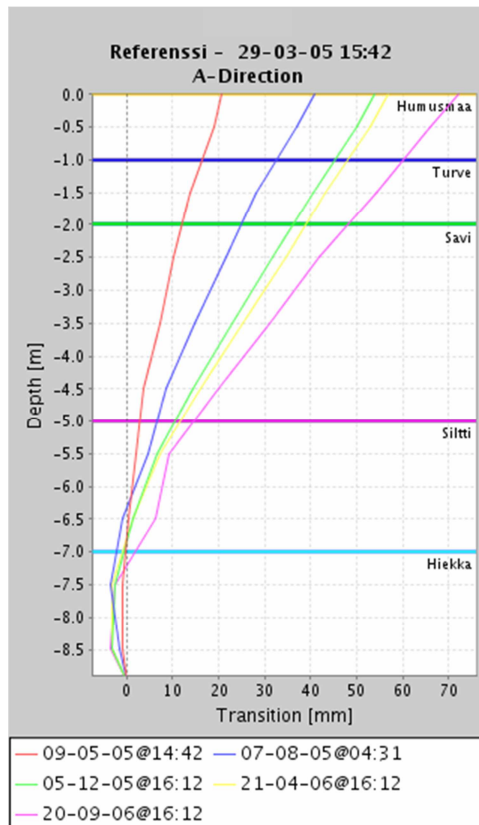


Kuva 4. Vasemmalla seurantapiste, jossa on prisman sovitin. Oikealla sama piste prisma kiinnitettynä.

3.4 Inklinometrimittaus

Inklinometrimittaus on maaperän liikkeiden seurantaan käytetty mittausmenetelmä. Inklinometri asennetaan maahan painettuun tai porattuun inklinometriputkeen, josta se kulma-antureiden avulla mittaa asennon suhteessa maan vetovoimaan. Asennus täytyy aina suorittaa kovaan, liikkumattomaan pohjaan saakka, koska mittaukset suoritetaan putken alaosan suhteen. Putken asennuksessa täytyy pyrkiä pystysuoruuteen, koska pystysuorassa putkessa mittaustarkkuus on vinoa parempi. [12, s.10.]

Inklinometrimittausten tuloksena saadaan tietoa maaperän eri kerrosten vaakasuuntaisista siirtymistä. Myös painumien havaitseminen on mahdollista, mutta epätarkkaa, koska anturien kulman muutos on painumissa hyvin pientä. Painumien mittaus on mahdollista inklinometreillä, jos putki asennetaan vaakasuoraan. Tällöin tulee varmistaa putkeen pään paikallaan pysyminen. [13, s. 21.]



Kuva 5. Esimerkki inklinometrin tuottamasta mittausdatasta (Finmeas)

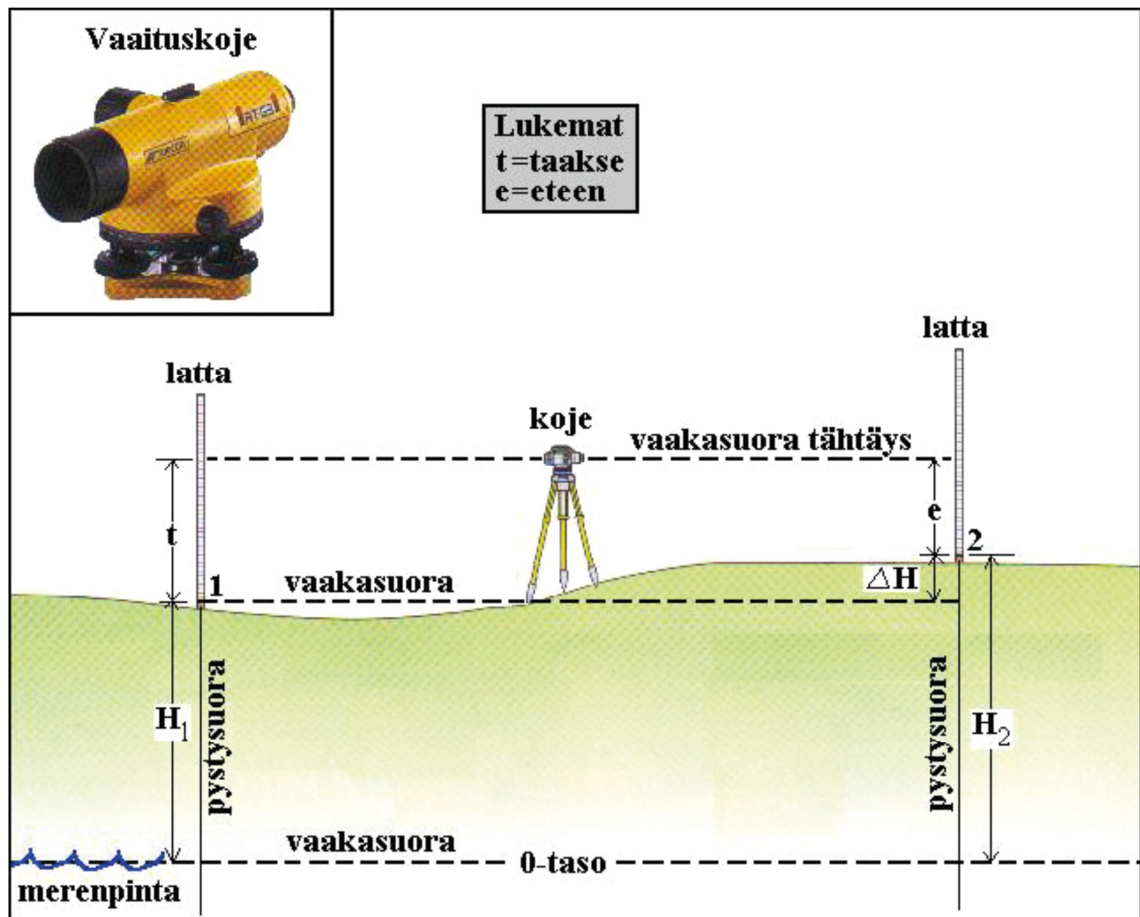
Menetelmän mittaustarkkuus on käytännössä havaittu olevan noin 2 - 5 mm. Tämä tarkkuus edellyttää, että inklinometriputki on asennettu huolellisesti kovaan pohjaan, jolloin sen alaosa voidaan pitää liikkumattomana. Jos putken alaosa pääsee liikkumaan, mittaustarkkuus on noin 10 - 30 mm. [13, s. 21]

Inklinetrimittauksia voidaan suorittaa manuaalisesti tai automatisoituna. Manuaalisessa mittauksessa putkessa liikutetaan mittaussondia ja tulokset tallennetaan määräväleihin. Automatisoidussa mittauksessa putkeen asennetaan määräväleihin mitta-antureita, jotka seuraavat siirtymiä reaaliaikaisesti. Automatisoitu inklinetrimittaus on reaaliaikaisuutensa ansiosta turvallisempi menetelmä kriittisissä kohteissa.

3.5 Tarkkavaaitus

Vaaituksella selvitetään kohteiden välisiä korkeuseroja. Vaaituksissa suoritetaan vaakasuora tähtäys pystysuoraan mitta-asteikkoon eli lattaan. Ensimmäiseksi vaaitaessa suoritetaan taaksepäintähtäys lähtöpisteeseen. Latan lukema lisätään lähtöpisteen

korkeuteen, jolloin saadaan selville kojeen korkeus. Tämän jälkeen suoritetaan eteenpäintähtäys seuraavalle pisteelle. Nyt latan lukema vähennetään saadusta kojeen korkeudesta, jolloin saadaan laskettua halutulle pisteelle korkeus. Näin on saatu siirrettyä korkeus lähtöpisteeltä seuraavalle pisteelle.



Kuva 6. Vaaituksen peruseriaate [14, s. 27]

Tarkkavaaituksesta on kyse silloin, kun vaaituksen keskivirhe on $0,2 \dots 0,5 \text{ mm/km}$ [12]

Tarkkavaaitus on menetelmä, jota käytetään lähes aina kun jonkin kohteen pystysuuntaisia siirtymiä halutaan mitata. Joissakin kohteissa ei päästä suorittamaan vaakasuoraa tähtäystä kohteeseen. Tällöin joudutaan käyttämään muita menetelmiä korkeuden määrittämiseen esim. takymetrimittaukset. [14, s. 27.]

Vanhemmilla tarkkavaaituskojeilla mitattaessa, mittaja lukee lukemat latasta. Uudemmissa kojeissa lukemisen suorittaa koje itse. Kuvassa 7 on koje, jolla mitattaessa täytyy lukemat itse lukea ja kirjata.



Kuva 7. Leica Wild NA2 -tarkkavaaituskoje ja vaaituslatta

Monitorointimittauksissa mitattaville pisteille siirretään korkeus samoin kuin normaalisakin vaaituksessa. Erona ns. normaaliin vaaitukseen on, ettei lähtöpisteen korkeuden tarvitse välttämättä olla sidottu valtakunnalliseen korkeusjärjestelmään. Monitorointimittauksissa tärkeintä on liikkeen mittaaminen, joten korkeusjärjestelmällä ei ole mittauksen kannalta merkitystä. Lähtö- ja sulkupisteen tulee kuitenkin olla mahdollisimman liikkumattomassa alustassa, kuten kalliossa (kuva 8). Mittausten laadunvarmistamiseksi on hyvä rakentaa lähtöpisteitä useampia ja suunnitella niiden paikat niin, etteivät ne esim. tuhoudu rakennustöiden aikana.



Kuva 8. Korkeuskiintopiste kalliossa ja suuressa maakivessä

Nykyiset yleisesti käytettävät tarkkavaaituskojeet ovat varsin helppokäyttöisiä. Mittauksissa käytettävät viivakoodilatat sulkevat tehokkaasti lukemavirheiden mahdollisuuden mittauksista pois. Tarkkuutta täytyy kuitenkin edelleen kiinnittää latan pystysuorassa pitämiseen. Lukemavirhettä saattaa tulla jos, lattaa pidetään vinossa kojeen tähtäys-suunnassa.

3.6 Ekstensometri

Ekstensometrit mittaavat kahden pisteen välisen etäisyyden muutosta. Geoteknisissä mittauksissa ekstensometrejä käytetään yleisesti tunnelirakennuskohteissa kallion liikkeiden havaitsemiseen. Ekstensometrit asennetaan esim. kallioreikään, ja eri syvyyksiin asennetut ankkurit liikkuvat referenssipäähän nähden kallion liikkeiden mukana. Menetelmän mittaustarkkuus vaihtelee riippuen käytettävästä laitteistosta. Tarkimmillaan päästään 0,01 mm:n tarkkuuteen, mutta tyypillisesti muutaman millimetrin tarkkuuteen. [15, s. 21.]

Myös ekstensometrimittaukset ovat automatisoitavissa, jolloin kohteen liikettä voidaan seurata reaaliaikaisesti. Automaattisten mittausten tulokset saadaan siirrettyä työmaal-

ta suoraan suunnittelijalla tietoliikenneverkkojen avulla. Tämä tuo myös rahallista säästöä projekteille vähentyneiden työmaakäyntien takia.

3.7 Satelliittimittaukset

Satelliittimittaus on eri satelliittipaikannusjärjestelmien avulla tehtävää sijainnin määrittystä. Nykyään satelliittimittauksesta puhuttaessa voidaan käyttää termiä GNSS (Global Navigation Satellite System). Suomessa sijainnin määrittämiseen käytetään yhdysvaltalaisen GPS-järjestelmän (Global Positioning System) lisäksi venäläisten GLO-NASS-järjestelmää (Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema). Lähitulevaisuudessa joukkoon liittyy myös eurooppalainen Galileo-järjestelmä.

Satelliittien avulla tehtävä paikanmääritys jaetaan absoluuttiseen, differentiaaliseen ja suhteelliseen paikanmääritykseen. [16, s. 206.]

3.7.1 Absoluuttinen paikanmääritys

Absoluuttinen paikanmääritys suoritetaan yksittäisellä vastaanottimella, joka vastaanottaa satelliittien lähettämiä signaaleja. Signaalien kulku-aika satelliittiin kun tiedetään, pystytään myös etäisyys satelliittiin laskemaan. Signaalin mukana siirtyy myös tieto satelliitin sijainnista ja näin voidaan vastaanottimenkin sijainti laskea. Laskennan onnistuminen vaatii vähintään yhteyden neljään satelliittiin. Menetelmän tarkkuus on parempi kuin 10 m, mutta paikannustarkkuus voi vaihdella merkittävästi satelliittigeometriasta, mittauspaikasta ja muista virhelähteistä, kuten ilmakehän eri kerroksista ja auringon aktiivisuuden vuoksi.

3.7.2 Differentiaalinen paikanmääritys

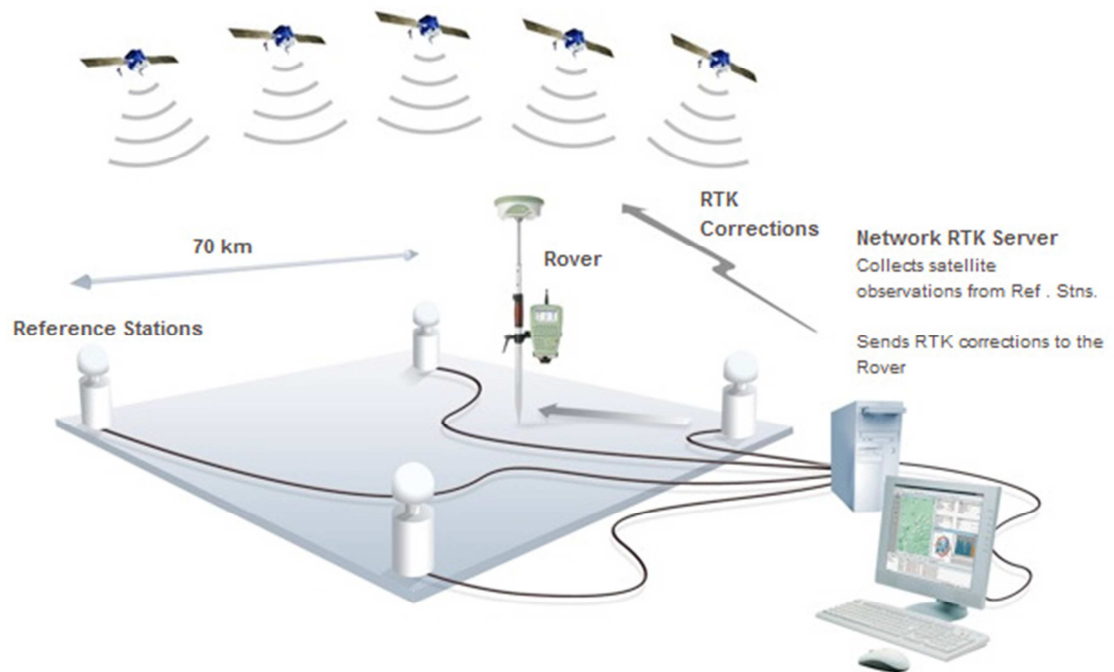
DGPS eli differentiaalinen GPS tarkoittaa menetelmää, jossa käytetään hyväksi toista tunnetussa pisteessä olevaa vastaanotinta paikannuksen tarkentamiseksi. Tätä vastaanotinta kutsutaan tukiasemaksi. Yksinkertaistettuna voidaan sanoa, tukiaseman mittaavan jatkuvasti paikannuksen poikkeamaa oikeista koordinaateista. Tosiasiassa korjaukset tehdään yleensä koordinaattien sijasta tarkkailtavien satelliittien etäisyyksiin, jolloin käyttäjän laite voi vapaasti valita käyttöönsä parhaat satelliitit kaikista näkyvistä.

Tukiasemana käytetään vastaanotinta, jonka antenni on sijoitettu mahdollisimman katveettomaan paikkaan. Vastaanotin pystyy kiertoratatietojen ja oman sijaintinsa perusteella laskemaan tarkat etäisyydet satelliitteihin. Kun se samalla myös mittaa etäisyydet normaalin paikantimen tavoin, saadaan mitatun ja lasketun etäisyyden erotuksena selville etäisyyksiä häiritsevät virheet. Jos erotuksilla korjataan tuntemattomassa pisteessä, eli varsinaisella mittauslaitteella, havaittuja satelliittien etäisyyksiä, saadaan korjattujen etäisyyksien avulla koordinaatit laskettua oleellisesti tarkemmin. Menetelmällä päästään n. 0,5–5 m:n tarkkuuteen.

3.7.3 Suhteellinen paikanmääritys

Suhteellisessa paikanmäärityksessä käytetään hyväksi satelliittien lähettämien signaalien kantoaaltoa. Menetelmään vaaditaan vähintään kaksi vastaanotinta, joista toinen on koordinaateiltaan tunnetulla pisteellä. Paikannustarkkuuden parantamiseksi lasketaan vastaanottimien välisiä koordinaattieroja. Vastaanottimen lukittuessa satelliitin signaaliin vastaanotin mittaa sen hetkisen kantoaallon vaiheen. Tästä hetkestä eteenpäin vastaanotin alkaa laskea signaalin tulevien kokonaisten aallonpituuksien lukumäärää. Kun satelliitti liikkuu radallaan, sen etäisyyden muutos näkyy vastaanottimen laskevien saapuneiden aallonpituuksien lukumäärässä. Kun useampaa satelliittia on havaittu jonkin aikaa, aallonpituuksista voidaan laskea satelliitin etäisyys vastaanottimesta. [17]

Menetelmän tärkeimmät sovellukset ovat staattinen ja RTK-mittaus. RTK-mittauksessa koordinaattien korjaus lasketaan reaaliajassa. Tällä hetkellä Suomessa ja maailmalla on yleisesti käytössä verkko-RTK-menetelmä, eli VRS-menetelmä. Menetelmässä vastaanottimen viereen luodaan virtuaalinen tukiasema, joka määrittyy kiinteän tukiasemaverkon havaintojen ja eri virhelähteiden mallinnuksen avulla. Menetelmän tarkkuus on alle 5 cm (kuva 9). [18, s. 8.]



Kuva 9. RTK-tukiasemaverkon toimintaperiaate

3.7.4 Satelliittipaikannuksen käyttö monitoroinnissa

Satelliittipaikannuksen tarkkuus ei aivan yllä takymetreillä suoritettaviin mittauksiin. Myöskään sisätiloissa ja erittäin peitteisissä paikoissa sen käyttö ei ole mahdollista. Satelliittipaikannus sopii sitä vastoin erinomaisesti erilaisiin inventaariomittauksiin, joissa esim. seurataan maa-ainekasojen tilavuutta. Näissä mittauksissa ei satelliittipaikannuksen hivenen huonommasta tarkkuudesta ole haittaa. Menetelmä on varsin nopea, koska mittalaitteiden pystyttämiseen ja orientointiin ei kulu aikaa.

Satelliittimittauksen staattista menetelmää käytetään myös maankuoren muutosten mittauksiin. Tällaisia muutoksia ovat esim. maannousu, jota tapahtuu erityisesti Merenkurkun alueella. Suomen 13 pysyvän GPS-aseman avulla saadaan määritetyksi maannousua geosentrisesti eli maan massakeskipisteen suhteen.

Staattisella menetelmällä mitatut kiintopisteet voivat toimia takymetrillä suoritettavien monitorointien lähtöpisteinä. Tällöin saadaan mittaukset sidottua valtakunnalliseen koordinaatistoon alueilla, joilla ei ole kiintopisteverkkoa.

3.8 Laserkeilaus

Laserkeilaus perustuu keilaimen lähettämiin laserpulsseihin, jotka heijastuvat mitattavaan kohteeseen osuessaan takaisin vastaanottimeen. Yksittäinen laserpulssi saattaa osua matkallaan useampaan kohteeseen, jolloin laitteen sensorit tallentavat useamman kuin yhden paluukaiun pulssista. Kaikki kaiut saavat luokituksen, ja jälkilaskennan avulla koordinaatit. Keilauksesta muodostuu pistepilvi, joka voi sisältää useita miljoonia mitattuja pisteitä. Yleensä ensimmäinen tehtävä aineiston käsittelyssä onkin pisteiden karsiminen. [19]

Laserkeilaus on suhteellisen hidasta, joten sitä käytetään vain rakenteen muodon ja pysyvien muodonmuutosten mittaamiseen, mutta se ei sovellu dynaamisiin mittauksiin. Menetelmällä saatu tarkkuus riippuu rakenteen koosta ja keilaimen etäisyydestä rakenteesta. Hyvissä olosuhteissa voidaan saavuttaa senttimetrin tarkkuus.

Laserkeilauksen vahvuudet tulevat hyvin esille monitoroitaessa suuria alueita, esim. kaivosteollisuudessa. Avolouhoksissa menetelmän käyttö on ollut maailmalla jo useamman vuoden käytössä. Suomessa laserkeilausta käytetään melko vähän monitorointimittauksissa.

3.9 Tulosten analysointi

Monitoroinnin tuloksia voidaan yleensä analysoida vasta kun useampi mittauskerta on suoritettu. Yhden mittauskerran tuloksia voidaan verrata kohteen suunnitelmiin, mutta tällöin oikeampi termi on tarkemittaus. Kohteen liikkumiseen ja muodonmuutoksen havaitsemiseen tarvitaan vähintään siis kaksi mittauskertaa. Useamman kerran perusteella voidaan päätellä, onko tuloksissa karkeita virheitä, ovatko kiintopisteet pysyneet paikoillaan sekä kuinka suuria ovat kohdepisteiden liikkeet.

Pisteiden odotettavissa olevaa liikettä voidaan kutsua signaaliksi ja mittausvirhettä kohinaksi. Tällöin mittauksen signaali/kohinasuhteen tulee olla mahdollisimman suuri. Jos suhdeluku on yli kymmenen, ei tulosten tulkinnassa todennäköisesti ole ongelmaa. Pienemmillä suhdeluvuilla tulosten tulkinta vaikeutuu, ja kovinkaan pitkällä vieviä johtopäätöksiä ei tuloksista voida tehdä. Siten mittausvirheen tulisi olla korkeintaan yksi

kymmenesosa odotettavissa olevasta liikkeestä. Tämän takia mittaustavaksi ja laitteistoiksi tulisi aina valita tarkin käytettävissä olevista. [20, s. 65.]

4 Mittausten laatu ja laadun varmistus

Kaikissa mittauksissa on mukana virheitä. Mittausten virhelähteitä on monia, mutta niitä pystytään kontrolloimaan eri menetelmillä. Laadukkaiden mittausten perustana ovat laadukkaat ja oikein mittaavat mittalaitteet. Mittalaitteiden oikein mittaus voidaan varmistaa kalibroinnilla ja laitteiden säännöllisillä tarkastuksilla.

Suurin virhelähde kuitenkin on mittaaja itse. Vaikka koje mittaisi oikein, huolimaton tai ammattitaidoton mittaaja ei saa oikeita tuloksia aikaiseksi. Ammattitaito saavutetaan kokemuksen ja koulutuksen myötä ja huolimattomuusvirheitä pystytään karsimaan säännöllisillä mittausrutiineilla. Kaikkiin mittauksiin tulisi sisällyttää jonkinlainen tarkastus, jolla pystytään toteamaan mitattujen arvojen oikeellisuus, esimerkiksi mittausten sulkeminen. Suuremmissa organisaatioissa, joissa on useampia mittaajia ja mittalaitteita hyvä tapa on pitää kaikilla omat henkilökohtaiset mittalaitteet. Näin kaikille laitteille saadaan vastuuhenkilö, joka vastaa niiden toimivuudesta. Laitteiden omakohtainen tarkastaminen kerran viikossa myös varmistaa osaltaan virheiden määrän pysymisen mahdollisimman pienenä. [21, s. 305.]

Mittausolosuhteet vaikuttavat mittausten tuloksiin. Saman kohteen mittaus eri lämpötiloissa voi vaikuttaa tuloksiin merkittävästi. Mittalaitteisiin pystytään syöttämään korjauskertoimia esimerkiksi sään muuttuessa, jolloin pystytään paremmin hallitsemaan virheitä. Tarkoissa, alle 1 mm:n, mittauksissa on tarkoituksenmukaista liittää erillinen sääasema mittalaitteen yhteyteen. Tällaisissa tapauksissa mittaus yleensä tapahtuu sisätiloissa, koska ulkona ei muuttuvia olosuhteita tarpeeksi pystytä hallitsemaan.

4.1 Virhelajit

Kaikissa mittauksissa on aina virhettä. Osa virheistä johtuu mittausvälineistä, osa mittaajasta ja osa ympäristöstä. Kun havaintosarjoja tehdään useampia tai useammalla tavalla, huomataan mittaustulosten poikkeavan toisistaan. Nämä virheet on jaettu neljään eri ryhmään, jotka ovat karkea, säännöllinen, satunnainen ja todellinen virhe.

4.1.1 Karkea virhe

Karkea virhe syntyy yleensä mittaajan toimesta tai jos mittalaitteeseen tulee toimintahäiriö. Karkea virhe poikkeaa selvästi oikeasta arvosta. Tällainen virhe voidaan välttää valitsemalla kunnossa olevat mittalaitteet sekä ammattitaitoinen mittaushenkilö.

4.1.2 Säännöllinen virhe

Säännöllisestä virheestä puhutaan myös systemaattisena virheenä. Tällä tarkoitetaan virhettä, joka on aina järjestelmällisesti samansuuruinen, samaan suuntaan. Virhe johtuu yleisimmin mittalaitteesta ja ulkoisista olosuhteista. Se voidaan välttää huoltamalla, tarkastamalla ja säätämällä mittalaite säännöllisesti.

4.1.3 Satunnainen virhe

Satunnainen virhe on tilastollinen virhe, joka esiintyy lähes aina mittauksissa. Puhutaankin yleensä tilastollisesta virheestä. Tätä virhettä ei voida välttää, mutta se voidaan kompensoida lisäämällä mittaukskertoja, jolloin tilastolliset virheet tasoittuvat.

4.1.4 Todellinen virhe

Todellinen, eli absoluuttinen virhe on mitatun tuloksen ja todellisen arvon erotus. Todellista arvoa ei välttämättä aina tiedetä. Tällöin voidaan todellisena arvona pitää suuren havaintojoukon keskiarvoa.

4.2 Hyvä mittaustapa

Hyvällä mittaustavalla tarkoitetaan sitä, että mittauksen suorittaa ammattitaitoinen ja kokenut mittaaja, kalibroidulla kojeella, käytännössä hyväksi havaittuja mittausmenetelmiä ja mittaustekniikkaa käyttäen.

Hyvään mittaustapaan kuuluu myös mittausten toistettavuus ja jäljitettävyyys. Nämä saavutetaan tarkalla dokumentoinnilla, joka nykyisissä mittalaitteissa on tehty mittaajille helpoksi. Miltei kaikista laitteista saa mittauksista määrämuotoisen raportin, josta selviää muun muassa orientointitapa ja -tarkkuus sekä mitattujen pisteiden tarkkuudet. Tar-

kan dokumentoinnin turvin kuka tahansa koulutettu mittaaja pystyy suorittamaan mittaukset samoin kuin edellisellä kerralla on tehty. Suositeltavaa kuitenkin on, että monitorimittauksen suorittaa sama henkilö 0-mittauksesta, viimeiseen seurantakertaan asti. Tällöin varmistetaan mittausten samanlainen suoritus kerrasta toiseen.

Maanmittausta opettavissa oppilaitoksissa opetetaan sulkemaan mittaukset aina viimeisen havainnon jälkeen. Todellisuudessa tästä hyvään mittaustapaan kuuluvasta tavasta on monissa paikoin jostain syystä luovuttu. Mittausten sulkeminen on yksinkertaisin, varmin ja nopein tapa varmistaa mittalaitteen paikalla pysyminen mittauksen aikana.

4.3 Kalibrointi

Kalibroinnilla tarkoitetaan mittauskokeen tulosten oikeellisuuden testausta. Kalibrointi sisältää kaikki toimenpiteet, joiden tavoitteena on kokeen virheiden määrittäminen. Siihen voidaan laskea myös kalibroitavan kokeen säätö. Kalibroinnilla saadaan selville mittauksissa esiintyvät systemaattiset virheet ja satunnaisten virheiden aiheuttama hajonnan arvo. Vain näin voidaan määrittää mittauskokeen tarkkuus.

Kalibrointi voi myös kattaa pelkän mittakokeen lisäksi koko mittausmenetelmän, laskentaohjelman ja mittaajat. Näin laajan kalibroinnin suorittamiseen tarvitaan hiukan enemmän järjestelyitä. Hyvä kohde tällaiselle kalibroinnille on esim. jonkin tunnetun ja tarkkaan mitatun kohteen mittaaminen kokonaan toisella yhdistelmällä.

Kalibrointi vaikuttaa suoraan kokeiden käyttökuntoon ja tarkkuuden säilyttämiseen. Mittauskojeet ovat arvokkaita optisia, hienomekaanisia ja elektronisia laitteita, joiden kalibroinnilla säilytetään niiden alkuperäinen mittaustarkkuus ja taloudellinen arvo.

4.3.1 Kalibrointilajit

Kalibrointitoiminta voidaan jakaa kahteen osaan. Nämä ovat määrittyskalibrointi ja seurantakalibrointi. Määrittyskalibrointi tehdään mittalaboratoriossa ja seurantakalibrointi mittaustarkkuudessa.

4.3.2 Määrityskalibrointi

Määrityskalibrointi suoritetaan laboratorio-olosuhteissa. Kalibroinnin suorittajalla tulee olla kansallisen tai kansainvälisen mittausalan organisaation akkreditointi. Määrityskalibrointi on hyvä tehdä kojeen hankinnan yhteydessä, suurempien huoltotoimenpiteiden jälkeen ja kojeille, joiden tarkkuuden on todettu oleellisesti muuttuneen. Määrityskalibroinnin tarkoituksena on todeta

- onko kojeen mittaustarkkuus määräysten mukainen
- vastaako kojeen mittaustarkkuus mittaustehtävien edellyttämää tarkkuutta
- onko kojeen mittaustarkkuus valmistajan ilmoituksen mukainen.

4.3.3 Seurantakalibrointi

Seurantakalibrointi, eli kenttäkalibrointi, on kalibrointi jonka tekee itse kojeen käyttäjä. Siinä ei määritetä kojevirheiden arvoja vaan ainoastaan seurataan, pysyvätkö kojeen ominaisuudet ja mittaustulokset samoina kuin ne olivat määrityskalibroinnissa. Seurantakalibroinnissa testilinjalla tai -kentällä tehdään toistomittauksia säännöllisin väliajoin ja seurataan kojeen toiminnallista kuntoa, mittaustuloksen muutosta verrattuna tehtaan kojeelle ilmoittamiin sallittuihin muutosarvoihin. Seurantakalibroinnin tulokset tulee dokumentoida hyvin, jotta mahdolliset muutokset huomataan ja niihin voidaan reagoida.

5 Mittausohjelman laatiminen

Onnistuneen monitorointimittauksen taustalla on hyvä mittauksensuunnittelu. Suunnitelman tekijällä tulisi olla geoteknisistä mittauksista vähintään perusteet hallussa. Tällä varmistetaan se, että monitoroitava kohde tulee mitatuksi oikealla tavalla ja oikeilla mittavälineillä. Mittausohjelman tulisi vastata neljään kysymykseen:

1. Miksi mitataan?
2. Mitä mitataan?
3. Miten mitataan?
4. Millaisia siirtymiä on odotettavissa?

Miksi jotakin kohdetta aletaan monitoroida? Kohteessa saattaa olla havaittu jo ennen mittauksia siirtymiä tai muodonmuutoksia ja näitä halutaan seurata. Tai tiedossa on, että kohteen läheisyydessä aloitetaan muutostyöt, jotka tulevat vaikuttamaan mitattavan kohteen stabiiliteettiin.

Mittausohjelmasta tulisi selvittää, mitä kohtaa kohteesta mitataan. Seurattavien pisteiden pitää olla sijoittuneena kohteeseen siten, että niiden liike kuvaa hyvin koko kohteen kokonaisliikettä. Esim. pisteiden tulee olla tarpeeksi hajallaan ja sellaisissa paikoissa joissa liikettä on odotettavissa. Tarkalla mitattavien pisteiden sijainnin määrittelyllä helpotetaan myös kiintopisteiden sijainnin suunnittelua. Kiintopisteiden tulee olla tarpeeksi kaukana odotettavissa olevasta liikkeen alueesta.

Miten mitataan? Suunnitelmassa pitää määrittää käytettävä laitteisto ja mittaustiheys. Odotettavissa oleva liike määrittää pääosin nämä. Mittatavan kohteen muodot voivat myös määrittää käytettävän menetelmän valintaa, mutta harvemmin näin on.

6 Yhteenveto

Onnistuneiden geoteknisten mittausten ja monitorointien edellytyksenä on osaava henkilöstä, oikea mittauskalusto ja oikeanlaiset menetelmät. Vaikka kaikki kolme osaluetta olisivatkin kunnossa, virheitä mittauksissa on aina. Oikein suoritetuissa mittauksissa virheet ovat pienempiä, ja tarkalla dokumentoinnilla niitä pystytään hallitsemaan.

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli antaa vähemmän geoteknisistä mittauksista ja monitoroinnista tietäville paremmat valmiudet toimia mittausten parissa. Kaikkia eri mittausmenetelmiä työssä ei ole käyty läpi, vain yleisimmin käytössä olevat. Ala kehittyy koko ajan ja uusia menetelmiä saadaan markkinoille aina tasaisin väliajoin. Yksi uusimmista menetelmistä on laajojen alueiden painuntaan kehitetty nesteputken ja paineantureiden yhdistelmä. Tästä ja muista menetelmistä lisätietoa saa Suomen geoteknillisen yhdistyksen monitorointitoimikunnan julkaisusta, joka käyttää tätä insinööri-työtä pohjana.

Lähteet

- 1 Suomen geoteknillisen yhdistyksen internetsivut
<<http://www.getunderground.fi/web/page.aspx?refid=186>> Luettu 1.10.2015
- 2 SFS-EN 1997-1. Geotekninen suunnittelu. 1997. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto
- 3 Bäcklund, Jalle. 2013. Geotekninen monitorointi Suomessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto.
- 4 Salmenperä, Hannu. 2002. Valvonta- ja muodonmuutosmittaukset. Tampere: TTKK Geoinformatiikka.
- 5 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D, nro 3.
- 6 Haapanala, Sami. 2013. Kojemeteorologia. Verkkodokumentti. Aalto-yliopisto
<http://www.courses.physics.helsinki.fi/met/kojemet/Kojemet_2.pdf> Luettu 5.10.2015
- 7 Mittaustekniikan perusteet. 2007. Luento 8. Verkkodokumentti. TTK.
<http://electronics.physics.helsinki.fi/wp-content/uploads/2011/02/Luento8_2007_noise.pdf>. Luettu 28.9.2015
- 8 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D, nro 3.
- 9 Salmenperä, Hannu. 2002. Valvonta- ja muodonmuutosmittaukset. Tampere: TTKK Geoinformatiikka.
- 10 Salmenperä, Hannu. 2002. Valvonta- ja muodonmuutosmittaukset. Tampere: TTKK Geoinformatiikka.
- 11 Leica Geosystems sin internetsivut <http://www.leica-geosystems.fi/fi/Vakioprismat_84830.htm> Luettu 22.10.2015
- 12 Luomala, Heikki. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. Helsinki: Liikennevirasto
- 13 Savikurki, Silke. 2010. Ratapenkereen stabiliteettiin liittyvät seurantamittaukset ja niiden prosessointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. Helsinki: Liikennevirasto
- 14 Salmenperä, Hannu. 2004. Maasto- ja rakennusmittauksen perusteet. Tampere: TTKK Geoinformatiikka.

- 15 Bäcklund, Jalle. 2013. Geotekninen monitorointi Suomessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto
- 16 Laurila, Pasi. 2012. Mittaus ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemi: Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D, nro 3.
- 17 Maanmittauslaitoksen internetsivut
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>> Luettu 25.10.2015
- 18 Nikkanen, Tauno. 2012. Keskijänniteverkon suunnittelu GPRS- mittauksella, opinnäytetyö.
- 19 Maanmittauslaitoksen internetsivut
<<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/laserkeilausaineistot/laserkeilaustekniikka>>
Luettu 26.10.2015
- 20 Salmenperä, Hannu. 2002. Valvonta- ja muodonmuutosmittaukset. Tampere: TTKK Geoinformatiikka.
- 21 Rantanen, Pasi. 2001. Maastomittauksen perusteet. Helsinki: Opetushallitus